

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估	罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)
南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析	秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)
南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征	师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)
苏州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析	王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沐,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)
成都西南郊区春季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价	杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)
泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析	张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)
青奥会期间基于 $\delta^{13}\text{C}$ 观测的大气 CO ₂ 来源解析	徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)
民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析	韩博,黄佳敏,魏志强(4524)
畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究	张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)
有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物	邢奕,王骥,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)
基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性	楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)
亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征	龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)
浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析	马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)
太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应	高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)
利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)
三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估	杨兵,何丙辉,王德宝(4586)
太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价	武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)
滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义	余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)
洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性	王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)
蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化	赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)
三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究	卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)
模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险	刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)
有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验	张思,何江涛,朱晓婧(4651)
无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例	李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)
清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应	吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)
南方典型农田区浅层地下水污染特征	郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)
水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用	马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)
粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果	沈庆然,侯娟,李田(4700)
超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)
QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO ₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制	姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)
群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能	赵畅,王文昭,徐期勇(4720)
水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性	王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)
外加微量 N ₂ H ₄ 下 SBR 中硝化微生物特性	肖凡颖,张代钧,卢培利(4734)
部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析	鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)
典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响	姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)
生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析	张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)
开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析	吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)
全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性	李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)
水肥用量对玉米季土壤 CO ₂ 排放的综合影响	杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)
福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性	姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)
基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估	杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)
北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系	柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)
准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征	刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)
河北平原潮土中微生物对氮降解特征	张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)
砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响	廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)
碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力	蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)
不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响	孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲峰,展惠英(4857)
南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征	田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)
Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能	汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)
铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂	付军,范芳,李海宁,张高生(4882)
不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性	王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)
《环境科学》第37卷(2016年)总目录	(4899)
《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)	

部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析

鲁航, 信欣*, 管蕾, 邹长武, 余静

(成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610225)

摘要: 采用序批式污泥反应器(SBR), 接种好氧颗粒污泥(AGS), 以人工模拟低 COD/N 废水为进水水质, 在 pH 7.5~8.5, 温度为 30℃, DO 浓度约为 0.8 mg·L⁻¹ 的条件下, 通过逐步提高进水氨氮浓度的策略启动部分半硝化工艺。结果表明, 通过逐步提高进水氨氮浓度方法, 可在 60 d 内初步形成部分半硝化工艺。部分半硝化工艺运行期间, 系统对 NO₂⁻-N 的积累率基本维系在 80% 以上, 对 TN 的去除率平均为 64.54%, 出水亚硝态氮和氨氮(NO₂⁻-N/NH₄⁺-N) 比值平均达到 1.16, 符合厌氧氨氧化(ANAMMOX) 反应进水要求。同时, 基于高通量测序技术分析了对部分半硝化工艺启动后微生物种群结构组成, 其主要优势菌属有: *Candidate-division-TM7-norank* (相对丰度 68.63%)、*Saprospiraceae-uncultured* (8.26%)、*Thauera* (4.63%)、*Denitratisoma* (3.16%)、*Anaerolineaceae-uncultured* (1.63%) 和 *Anaerovorax* (1.39%)。部分半硝化 AGS-SBR 系统中与脱氮功能相关的主要菌属为: *Nitrosomonas*、*Thauera*、*Denitratisoma* 和 *Bacillus*, 该系统中存在自养脱氮、反硝化和厌氧氨氧化的多种脱氮途径。

关键词: 序批式反应器; 好氧颗粒污泥; 低 COD/N; 部分半硝化; 高通量测序

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4741-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201606189

Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition

LU Hang, XIN Xin*, GUAN Lei, ZOU Chang-wu, YU Jing

(School of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: The mature aerobic granular sludge (AGS) was inoculated in an sequencing batch reactor (SBR) to treat the simulation wastewater with low carbon nitrogen ratio (COD/N). The start-up characteristics of partial nitrification (PN) based on gradually increasing influent ammonia concentration strategy were investigated. The reactor was operated at dissolved oxygen (DO) of 0.8 mg·L⁻¹, pH 7.5-8.5 and 30℃. The PN was realized in the AGS-SBR within 60 days. From day 61 and onwards, the nitrite accumulation efficiency of 80% was achieved throughout the experiment. Meanwhile, the total nitrogen average removal rate was maintained at a relatively high level of 64.54%, and the effluent NO₂⁻-N/NH₄⁺-N ratio reached 1.16, which was a suitable mixture to feed subsequent anammox. Finally, we also investigated the bacterial abundances in AGS-SBR in the PN period (PN-AGS-SBR) through Illumina 16S rRNA gene MiSeq sequencing. The dominant microbial communities at genus level were subjected to sequence analysis. The results revealed that the relative abundance of *Candidate-division-TM7-norank* was 68.63%, *Saprospiraceae-uncultured* was 8.26%, *Thauera* was 4.63%, *Denitratisoma* was 3.16%, *Anaerolineaceae-uncultured* was 1.63% and *Anaerovorax* was 1.39%, respectively. *Nitrosomonas*, *Thauera*, *Denitratisoma* and *Bacillus* were considered as the main organisms responsible for nitrogen removal. Meanwhile, various denitrification pathways, such as autotrophic denitrification, the denitrification and anaerobic ammonia oxidation of nitrogen, coexisted in PN-AGS-SBR system.

Key words: sequencing batch reactor; aerobic granular sludge; low COD/N; partial nitrification; high-throughput sequencing

随着城市化和工业化发展, 低碳高氨氮污水排放量大幅增加。对于猪场沼液、污泥厌氧消化液以及垃圾渗滤液、焦化废水、味精废水等低 COD/N 废水处理, 目前传统的生物硝化-反硝化脱氮工艺由于碳源不足面临脱氮效率低的窘境^[1]。而建立在短程硝化基础上的部分半硝化和厌氧氨氧化工艺的组合作为被认为是处理低 COD/N 废水一个突破性的成果^[2-6]。该工艺与传统的全程硝化-反硝化工艺相比, 可节省 50% 的氧气和 100% 的外加有机碳源, 且污泥产量低, 具有非常好的应用前景^[7-9]。由于厌氧氨氧化过程以亚硝酸盐作为电子受体, 将氨直接转化为氮气, 因此部分亚硝化工艺[将 50%~60%

的氨氮氧化至亚硝酸盐氮, 控制出水 NO₂⁻-N/NH₄⁺-N 在 (1~1.32):1 之间] 作为 ANAMMOX 的前处理工艺受到越来越多的重视^[10-12]。

近年来, 有许多学者展开了相关的研究。李长波等^[13]采用序批式生物反应器(SBR), 以经生物流化床处理后的腈纶废水(氨氮浓度为 116~181 mg·L⁻¹) 为原水, 采用低 DO 浓度 (0.30~0.40

收稿日期: 2016-06-28; 修订日期: 2016-07-23

基金项目: 成都市科技惠民技术研发项目 (2015-HM01-00477-SF); 成都信息工程大学中青年学术带头人科研基金项目 (J201614)

作者简介: 鲁航 (1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制及资源化, E-mail: 363847427@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: xx@cuit.edu.cn

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的策略,在 pH 值为 7.2 ~ 7.6、温度为 30 ~ 35℃,曝气时间为 10 h 条件下,经过 27 d 的连续运行,成功实现了部分半硝化系统的快速启动. 在此条件下稳定运行后,平均亚硝化率可达到 95% 以上. Guo 等^[14]采用 SBR 反应器在进水氨氮浓度为 $147\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,DO 为 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,曝气时间为 3 h,温度为 30℃,pH 为 8.3 ± 0.1 条件下,反应器运行 100 d 后,部分半硝化工艺实现,稳定运行后平均亚硝化率可达到 80% 以上. 李祥等^[15]同样采用 SBR 反应器,以控制 DO 浓度的策略,将 DO 浓度维持在 $0.5\sim1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,77 d 后,基本实现了部分半硝化反应器成功启动,亚硝化率在 70% 左右.

上述研究,一方面多采用限制 DO 实现部分半硝化工艺的启动运行,然而低 DO 环境的维持需要精准的 DO 浓度反馈和控制,并且 DO 浓度的波动会立即影响反应器出水中的 $\text{NO}_2^- - \text{N}/\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 比例,进而会影响整个脱氮工艺的效能. 而游离氨 (FA) 浓度亦可作为控制亚硝化的关键因素^[16]. 另一方面,已有的研究采用的接种污泥多为普通活性污泥,反应器运行过程中,存在污泥易流失、承受容积负荷率低等问题^[17]. 而好氧颗粒污泥工艺凭借其良好的沉降性能、多样的微生物种群及密实的颗粒结构等优点,可以有效改善上述问题;并且好氧颗粒污泥具有独特的空间结构,其由边缘及内部存在溶解氧渗透梯度,形成好氧、缺氧或厌氧沿梯度方向分布的区域环境^[18],亚硝化菌的氧饱和系数较硝化菌低,使得颗粒污泥系统更适宜培养以亚硝化菌为主的菌群,有利于快速实现部分亚硝化.

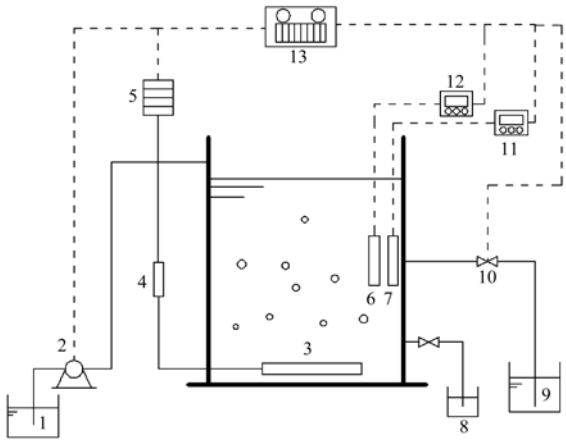
因此,本研究采用序批式污泥反应器 (SBR),接种成熟好氧颗粒污泥 (AGS),通过逐步提高氨氮浓度策略实现部分半硝化的成功启动,同时解析部分半硝化工艺的微生物种群结构组成,以期为该工艺在实际工程中的应用提供一定的实验依据和理论基础.

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行方式

采用有机玻璃加工而成的 SBR 反应器 (图 1). 反应器高 20 cm,长 10 cm,有效容积为 1.5 L;底部设置直径为 8 cm 的曝气盘,通过气泵和曝气盘为反应过程提供溶解氧,由转子流量计控制曝气量,DO 浓度约为 $0.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 反应器每天运行两个周期,每个周期 12 h,其中进水 5 min,曝气 360 min,沉淀 5 min,排水 5 min,余下时间为闲置. 每周排水量

为反应器有效容积的 50%. 反应温度保持在 30℃ 左右. 根据进水氨氮浓度变化分为 4 个阶段:第一阶段 I (1 ~ 23 d), $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 为 $70\sim85\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;第二阶段 II (25 ~ 89 d), $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 为 $100\sim130\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;第三阶段 III (91 ~ 117 d), $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 为 $160\sim200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;第四阶段 IV (119 ~ 167 d), $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 为 $200\sim300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 反应器运行过程中,根据实际情况进行排泥,使反应器内污泥龄约为 20 d.



1. 进水箱; 2. 进水泵; 3. 曝气盘; 4. 气体流量计; 5. 曝气泵;
6、7. pH 计、DO 仪探头; 8. 排泥箱; 9. 出水箱; 10. 出水控制阀;
11. 溶解氧仪; 12. pH 计; 13. 自动控制箱

图 1 SBR 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of SBR

1.2 实验用水

实验用水为人工模拟废水,以葡萄糖、柠檬酸三钠为碳源, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 为氮源, KH_2PO_4 为磷源, NaHCO_3 提供碱度, pH 约为 7.8. 同时,加入 1 mL 含 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 等离子微量元素储备液. 主要配水材料见表 1; 废水主要指标 $\rho(\text{COD})$ 为 $200\sim300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 为 $70\sim300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{TN})$ 为 $70\sim300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{TP})$ 为 $2\sim3.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 1 实验配水材料/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Composition of the simulated wastewater/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

成分	浓度	成分	浓度
葡萄糖	103.2	FeCl_3	0.1
柠檬酸三钠	282.8	$\text{CuCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.1
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	$330.4\sim1\ 200$	CoCl_2	0.1
KH_2PO_4	13.17	H_3BO_3	0.1
NaHCO_3	105	EDTA	0.1
CaCl_2	40	$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.1

1.3 接种污泥

接种污泥取自本课题组实验室培养成熟的好氧

颗粒污泥^[19], 污泥呈椭球状, 黄色. 粒径大约为 0.6 ~ 1.5 mm, 污泥浓度 (MLSS) 为 4 000 mg·L⁻¹, 污泥体积指数 (SVI) 为 35 mL·g⁻¹.

1.4 分析项目与方法

1.4.1 水质指标分析

化学需氧量 (COD)、氨氮 (NH₄⁺-N)、硝态氮 (NO₃⁻-N)、亚硝态氮 (NO₂⁻-N)、总氮 (TN) 等, 均采用国家标准方法测定^[20]. DO 采用 YSI DO200 型溶解氧仪测定; pH 采用雷磁 PHSJ-4A 型 pH 计测量.

1.4.2 污泥样品采集及测序实验流程

分别取接种颗粒污泥和部分半硝化 AGS-SBR 启动成功运行期末的颗粒污泥样品进行高通量测序分析. 其中, Control 为接种好氧颗粒污泥; HAP 为反应器启动成功 (第 170 d) 的污泥样品. 首先, 采用淤泥基因组 DNA 快速提取试剂盒 (离心柱型), 根据说明提取样品 DNA, 并将 DNA 提取物在 -20℃ 条件下保存. 然后, 采用对 16S rRNA 基因 V3、V4 区域具有特异性的引物对 338F: 5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3', 806R: 5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3', 进行 PCR 扩增. PCR 执行程序: 95℃ 预变性 2 min, 然后执行 95℃ 变性 30 s、55℃ 退火 30 s、72℃ 延伸 30 s, 共 30 个循环, 最后再 72℃ 退火 5 min, 扩增产物保持在 4℃ 条件下. 将同一样本的 PCR 产物混合后用 2% 琼脂糖电泳检测, 采用

AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒 (AXYGEN 公司) 切胶回收 PCR 产物; 然后, 参照电泳初步定量结果, 将 PCR 产物用 QuantiFluor™-ST 蓝色荧光定量系统 (Promega 公司) 进行检测定量, 取合适的浓度进行 EmPCR (平行扩增), 用 Illumina MiSeq 系统测序 (上海美吉生物医药科技有限公司), 得到优化序列; 对优化序列在 97% 相似度水平进行 OTU 聚类分析和物种分类学分析, 分析样品的多样性以及群落结构^[21,22].

2 结果与讨论

2.1 启动过程中反应器脱氮性能

2.1.1 NH₄⁺-N 及 TN 的去除变化分析

实验过程中反应器进出水 NH₄⁺-N、TN 浓度及其去除率的变化情况如图 2、图 3 所示. 逐步提高进水氨氮浓度, 同时增加有机物浓度, 保证进水 COD/N 比为 1.0 ~ 1.5 之间. 初始 I 阶段 (1 ~ 23 d), 进水 NH₄⁺-N 浓度在 70 ~ 85 mg·L⁻¹ 波动, 由于反应器内的氨氮浓度相对较低以及接种的成熟颗粒污泥结构稳定, 利于对氨氮的去除, 此阶段 NH₄⁺-N 平均出水浓度为 4.79 mg·L⁻¹, 平均去除率为 93.9%; 第 II 阶段 (25 ~ 89 d), 提高进水氨氮浓度在 100 ~ 130 mg·L⁻¹, 氨氮去除率呈下降趋势, 氨氮平均去除率为 81.73%, 出水中的氨氮也有所增加, 氨氮平均

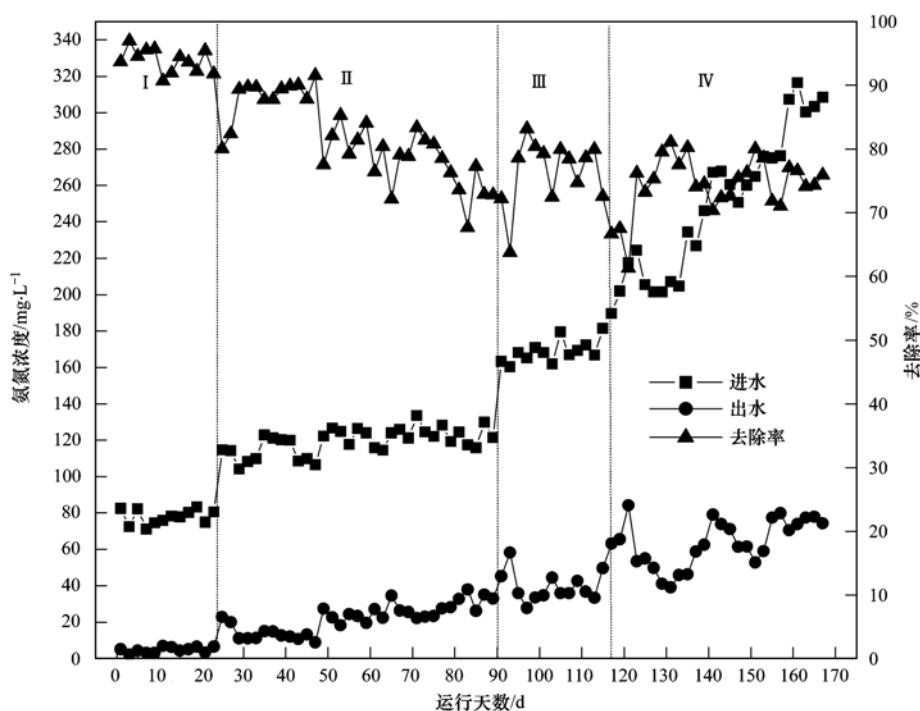


图2 启动过程NH₄⁺-N及其去除率的变化情况

Fig. 2 Variations of NH₄⁺-N concentration and its removal rate during the start-up process

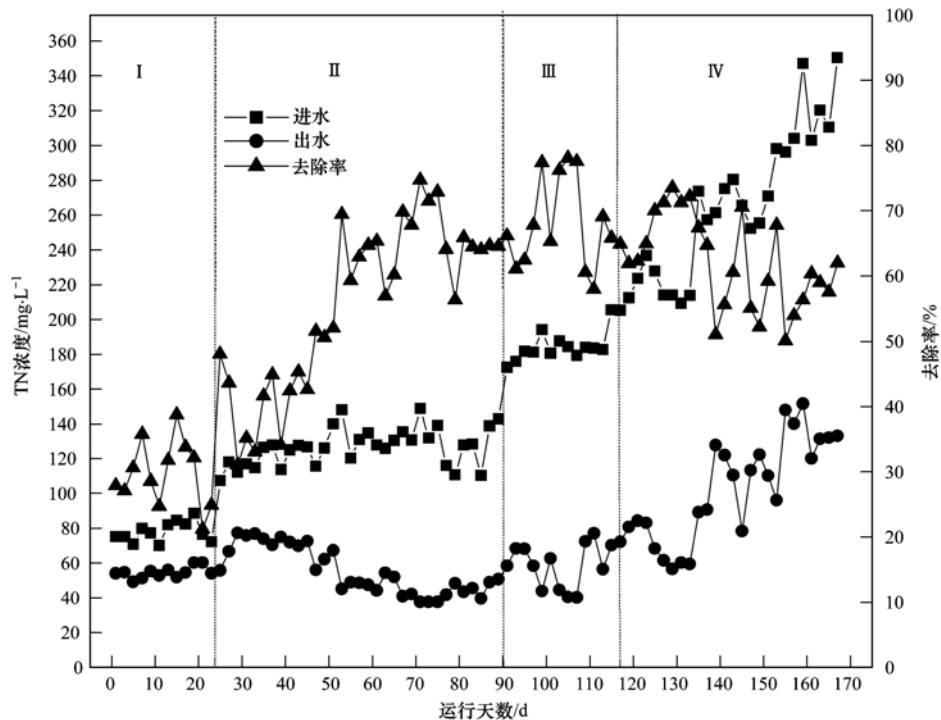


图3 启动过程 TN 及其去除率的变化情况

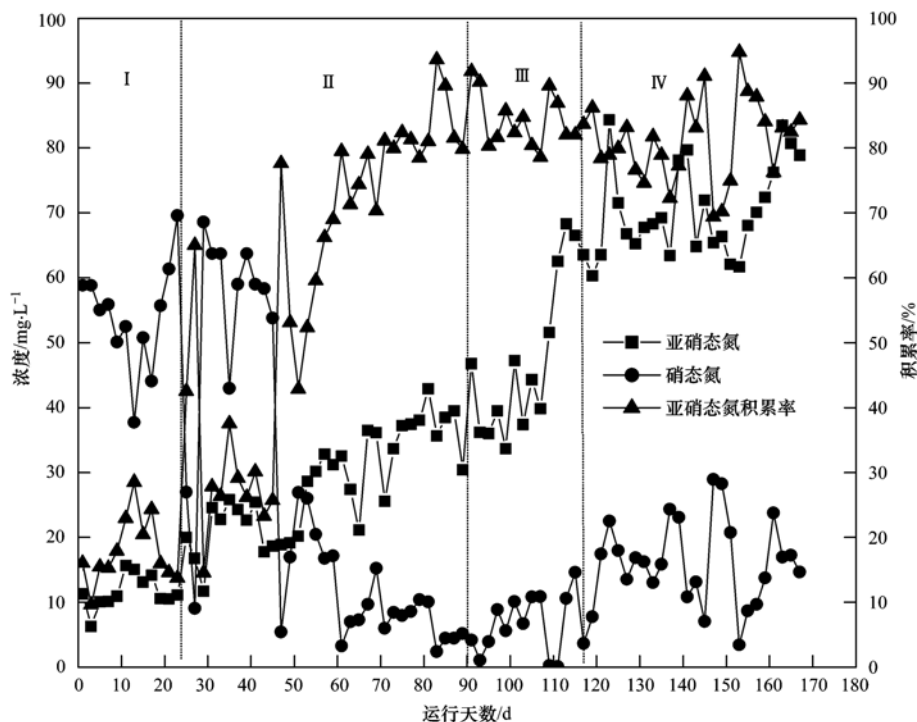
Fig. 3 Variations of TN concentration and its removal rate during the start-up process

出水浓度为 $22.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 第Ⅲ阶段(91 ~ 117 d), 继续提高进水氨氮浓度在 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 氨氮平均去除率为 75.51%, 出水氨氮浓度平均为 $41.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 结合图 4 可知, 此时 NO_2^- -N 的积累率高达 90% 左右, 出水 NO_3^- -N 浓度低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 结果表明通过提高氨氮浓度实现了好氧氨氧化细菌(AOB)富集, 短程硝化实现. 第Ⅳ阶段(117 ~ 167 d), 进水氨氮浓度提高至 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 氨氮平均去除率为 72.34%, 而出水氨氮浓度平均为 $63.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 陈益明^[23]和李东等^[24]曾分别采用半碱度和降低 DO 浓度控制亚硝化程度来启动部分半硝化过程中, 氨氮变化特征和本研究结果类似.

同时, 图 3 表明, 反应器在第Ⅰ阶段中, 对废水 TN 的平均去除率只有 29.75%; 而在第Ⅱ、Ⅲ阶段, 反应器对 TN 的去除效率逐渐升高, 第 60 d 开始明显升高, TN 平均去除率为 62.04%. 结合图 4, 可看出氨氮大部分转化为 NO_2^- -N, 此时, 出水 NO_2^- -N 的积累率达到 70% 以上, 部分半硝化工艺初步形成. 第Ⅳ阶段, 随着进水氨氮浓度的进一步升高, 反应器对 TN 的去除能力略微下降, 虽有波动, 但对 TN 的平均去除率最后基本维系在 60% 左右, 这与张子健等^[25]和陈建伟等^[26]的实验结果类似. 进水高氨氮浓度使反应器对 AOB 菌的选择作用为部分半硝化创造了条件.

2.1.2 出水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 浓度变化及 NO_2^- -N 的积累率

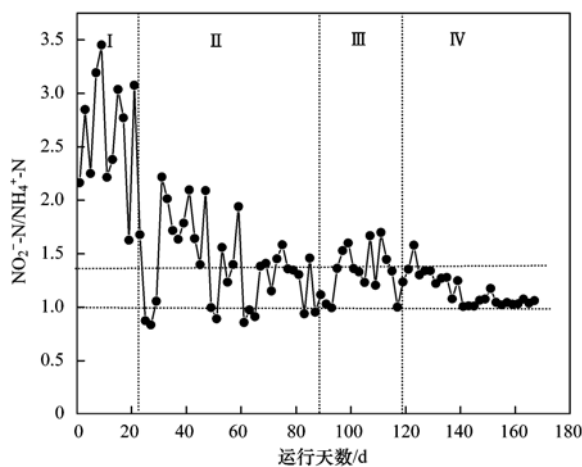
本实验过程中, 反应器出水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 浓度变化及 NO_2^- -N 的积累率变化如图 4 所示. 第Ⅰ阶段(1 ~ 23 d), 氨氮平均去除率可达到 93.90%, 出水 NO_2^- -N 平均浓度仅为 $11.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而出水 NO_3^- -N 平均浓度却达到 $54.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明此时反应器内氨氮大部分被氧化成硝态氮, 即亚硝化氧化细菌(NO₂⁻)的数量在反应初期高于 AOB. 第Ⅱ阶段, 提高进水氨氮浓度至 $100 \sim 130 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 NO_2^- -N 浓度逐渐上升, 而 NO_3^- -N 浓度逐渐下降, 反应器运行到第 60d 时, NO_3^- -N 浓度显著降低到 $3.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_2^- -N 浓度为 $32.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_2^- -N 的积累率达到了 79.52%. 第Ⅲ阶段, 进一步提高进水氨氮浓度到 $160 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_2^- -N 出水浓度不断提高, NO_3^- -N 出水浓度不断降低, NO_2^- -N 积累率平均维系在 90.06% 左右. 由图 4 可以看出, 在前 3 个阶段, 随着进水氨氮浓度的升高, 亚硝化率持续上升, 第 60 d 时, 部分亚硝化现象明显, 部分半硝化工艺初步形成. 这与李祥等^[27]利用低 DO 富集 AOB, 积累 NO_2^- -N 过程相似. 第Ⅳ阶段, 进水氨氮浓度为 $200 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_2^- -N 其平均积累率为 81.22%, NO_2^- -N 平均出水浓度为 $68.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

图4 启动过程 NO_3^- -N、 NO_2^- -N浓度及其积累率的变化情况Fig. 4 Variations of NO_3^- -N, NO_2^- -N concentrations and their accumulation rates during the start-up process

氨氮浓度为 $63.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_2^- -N/ NH_4^+ -N 比为 1.09. 本实验结果说明, 自 AGS-SBR 反应器运行的第 60 d 开始到反应器运行的第 170 d 里, 通过提高进水氨氮浓度的策略形成的部分半硝化工艺, 均表现出较稳定的亚硝酸盐积累 (80% 以上), 同时实验结果表明, 逐步提高进水氨氮浓度的策略形成的部分半硝化 AGS-SBR 工艺有利于保证长期稳定运行.

2.1.3 NO_2^- -N/ NH_4^+ -N

整个反应器运行期间, 出水 NO_2^- -N/ NH_4^+ -N 的比值变化情况如图 5 所示. 启动初期, 反应器具有较高的氨氮去除率, 出水氨氮浓度很低且 NO_2^- -N 浓度处于不断上升过程, 故 NO_2^- -N/ NH_4^+ -N 值较高, 高达 2.56. 第 II 阶段初期, 由于出水氨氮浓度升高, NO_2^- -N/ NH_4^+ -N 值降低, 在 0.85 ~ 2.09 波动. 结合图 2、4 发现, 在反应器运行的第 60 d 开始, 随着 NO_2^- -N 积累率升高和 NH_4^+ -N 转化率降低, NO_2^- -N/ NH_4^+ -N 比值大部分在 0.9 ~ 1.5 之间波动, 部分半硝化现象初步形成. 有研究发现, 当出水 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 的比为 1.0 ~ 1.3 时, 基本能满足厌氧氨氧化进水要求, 即部分半硝化启动成功^[28]. 在第 III 阶段, NO_2^- -N 平均出水浓度为 $52.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮平均出水浓度为 $41.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_2^- -N/ NH_4^+ -N 比值

图5 NO_2^- -N/ NH_4^+ -N 值变化情况Fig. 5 Variations of NO_2^- -N/ NH_4^+ -N with time

平均达到 1.27 左右, 符合 ANAMMOX 反应进水要求. 此时氨氮转化率平均为 70% 左右, 亚硝化率达到 76.59%, 氨氮转化率虽然高于张昭等^[29] 报道的 54%, 但其亚硝化积累率相差无几. 此后反应器运行的第 IV 阶段里, 平均出水 NO_2^- -N/ NH_4^+ -N 值基本稳定在 1.10 左右. 有研究者曾采用半碱度策略, 控制约 50% 的 NH_4^+ -N 转化为 NO_2^- -N, 出水 NO_2^- -N/ NH_4^+ -N 比为 1.0, 基本能保证部分亚硝化工艺稳定维系. 虽然本研究采用提高进水氨氮浓度的策略和前者不同^[28,29], 但同样可以使反应器出水 NO_2^- -N/

NH_4^+-N 比值在稳定期维系在 1.1 左右, 满足 ANAMMOX 反应进水要求。

2.2 部分半硝化 AGS-SBR 工艺微生物菌群结构分析

为明确部分半硝化 AGS-SBR 中微生物菌群结构组成, 采用高通量测序技术对接种污泥和部分半硝化 AGS-SBR 启动成功运行期末的污泥样品进行测序分析。其中, Control 为接种好氧颗粒污泥; HAP 为反应器启动成功(第 170d)的污泥样品。图 6 为污泥样品微生物菌群的相对丰度(门水平)。接种时期污泥样品中主要菌群为: Candidate-division-TM7 (相对丰度为 69.24%)、变形菌门

(Proteobacteria) (24.88%)、放线菌门 (Actinobacteria) (1.33%)、疣微菌门 (Verrucomicrobia) (1.13%)、厚壁菌门 (Firmicutes) (0.42%); 启动成功污泥样品中主要菌门有: Candidate-division-TM7 (68.63%)、变形菌门 (Proteobacteria) (13.56%)、拟杆菌门 (Bacteroidetes) (9.18%)、厚壁菌门 (Firmicutes) (3.64%)、绿弯菌门 (Chloroflexi) (2.26%)、绿菌门 (Chlorobi) (1.17%)。同时在两个样品中 Candidate-division-TM7 菌群所占比重最大, 其次是变形菌门 (Proteobacteria)。

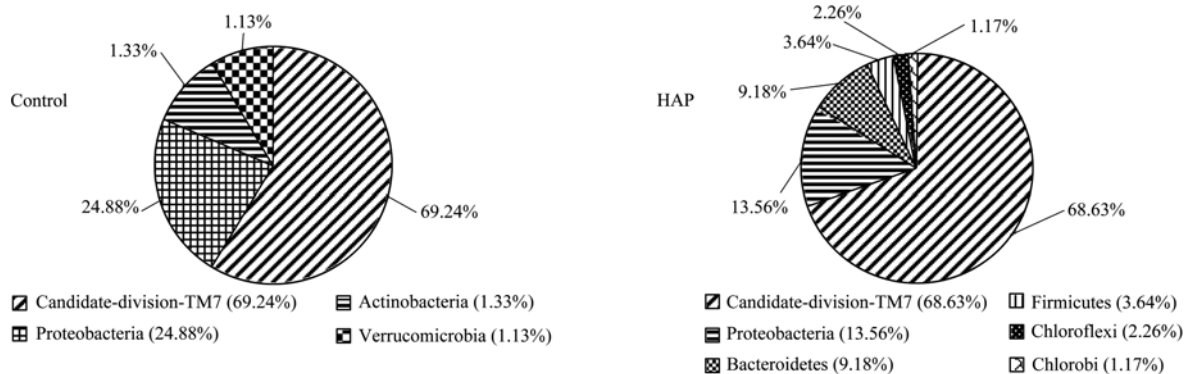


图 6 污泥样品微生物菌群的相对丰度(门水平)

Fig. 6 Relative abundance of bacterial community of sludge samples at phylum level

图 7 为污泥样品微生物菌群组成及其相对丰度(属水平)。接种污泥样品中的主要优势菌属有: *Candidate_division-TM7-norank* (69.24%)、*Ottowia* (4.83%)、*NKB5_norank* (3.38%)、紫细菌属 (*Rhodobacter*) 3.14%、德沃斯氏菌属 (*Devosia*) 2.97%、未分类生丝微菌 (*Hyphomicrobiaceae-unclassifieds*) 2.43%、黄杆菌 (*Flavobacterium*)

1.5%、*Pseudoxanthomonas* (1.39%)、申氏杆菌属 (*Shinella*) 1.35%；而部分半硝化 AGS-SBR 启动成功运行期末的主要优势菌属有: *Candidate_division-TM7-norank* (68.63%)、*Saprospiraceae-uncultured* (8.26%)、索氏菌属 *Thauera* (4.63%)、*Denitratisoma* (3.16%)、*Anaerolineaceae-uncultured* (1.63%) 和 *Anaerovorax* (1.39%)。从污泥主要种群

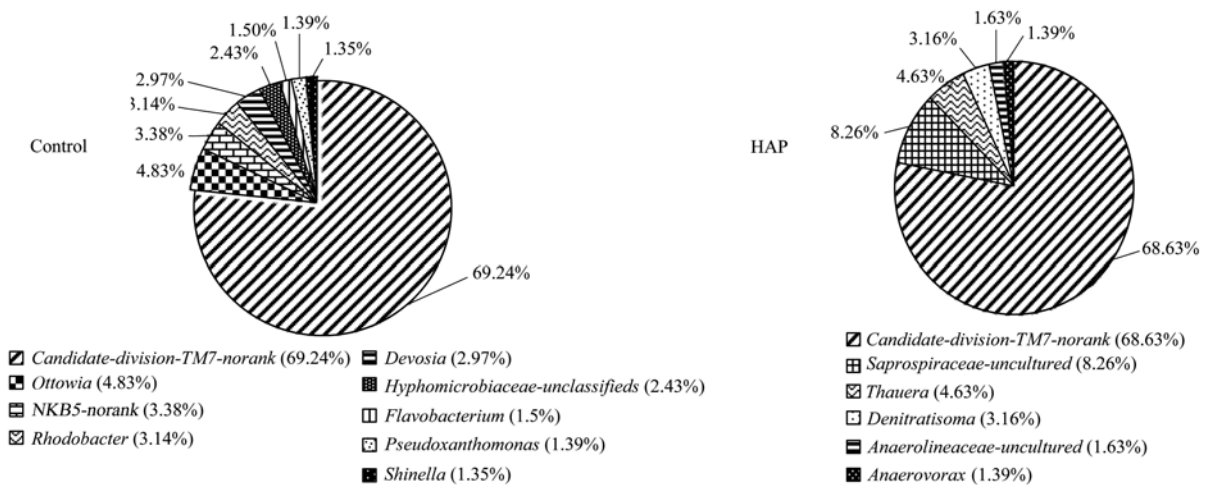


图 7 启动过程中污泥微生物菌属分布

Fig. 7 Genus distribution of sludge during the startup phase

和丰富度来看,接种污泥和部分半硝化污泥样品中共有的优势菌属是 *Candidate_division_TM7-norank*,在反应器内始终占主导地位;但是,随着进水氨氮浓度的提高,部分半硝化工艺的形成,反应器系统内其他菌群结构组成则发生了较大的改变,如接种污泥的黄杆菌属、*Devosia*、申氏杆菌属的含量逐渐下降并最终被淘汰出系统,说明其不适应在高氨氮浓度环境中存在;随着部分半硝化工艺的形成,*Saprospiraceae-uncultured*、*Thauera*、*Denitratisoma*、*Anaerolineaceae-uncultured*、*Anaerovorax* 成为新的主导菌群。

2.3 与脱氮功能相关的菌群的讨论

取反应器接种以及启动成功时期的颗粒污泥样品,基于 16S rRNA 的多样性分析,与氨氧化菌(AOB)、亚硝酸氧化菌(NO_B)、反硝化菌和厌氧氨氧化菌有关的菌群如表 2 所示。

表 2 与 AOB、NO_B、反硝化菌和厌氧氨氧化菌相关的群菌群(属水平)

Table 2 Relative abundance of AOB, NO_B, denitrifies and ANAMMOXbacteria at genus level

菌属	接种	丰度/%	启动成功	丰度/%
<i>Nitrosomonas</i> (AOB)	0	0	64	0.652
<i>Nitrospira</i> (NO _B)	0	0	1	0
<i>Comamonadaceae</i> (反硝化菌)	660	5.712	137	1.49
<i>Bacillus</i> (反硝化菌)	2	0.017	50	0.51
<i>Thauera</i> (反硝化菌)	0	0	455	4.61
<i>Flavobacterium</i> (反硝化菌)	173	1.497	11	0.11
<i>Cytophagaceae</i> (反硝化菌)	2	0.017	12	0.12
<i>Pseudomonas</i> (反硝化菌)	2	0.017	11	0.11
<i>Denitratisoma</i> (反硝化菌)	0	0	310	3.16
<i>Candidatus</i> (厌氧氨氧化菌)	0	0	2	0.02

亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*)是革兰氏阴性自养好氧菌,是 SHARON-ANAMMOX 反应器处理系统中最常见的菌群之一^[30]。本研究中,从表 2 中可以看出,接种污泥样品中几乎不含亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*),而成功启动时其丰度达到 0.652%,说明逐步提高氨氮的进水方式有利于 AOB 菌的富集,这与 Amann 等^[31]研究结果基本相似。AOB 菌群的明显富集,和 AGS-SBR 反应器运行性能基本吻合,即在反应器运行后期,氨氮主要转化为 NO₂⁻-N。

在接种污泥中, *Comamonadaceae* 和 *Flavobacterium* 具有较高的丰度(分别为 5.712% 和 1.497%)。有研究发现, *Comamonadaceae* 和 *Flavobacterium* 具有较好的反硝化脱氮效率^[32],因此,使 AGS-SBR 反应器运行初期,系统对氨氮、TN

去除就表现出较高的去除率;但是,随着进水氨氮浓度的提高,直至部分半硝化工艺形成后,二者丰度明显降低。实验结果表明,高氨氮浓度的环境可能不利于 *Comamonadaceae* 和 *Flavobacterium* 的有效富集。

与此同时,一些能够适应低碳高氨氮环境的脱氮菌群丰度明显增多,如 *Denitratisoma*、*Thauera* 和 *Bacillus*。 *Denitratisoma* 是红环菌科的一个新属,是一类新型的具有好氧反硝化能力的菌群,能直接将亚硝态氮转化为气态氮;索氏菌属(*Thauera*)是一类自养反硝化菌,能利用 H₂ 作为电子受体还原硝态氮^[33],而本实验结果中,其在部分半硝化系统中的丰度明显增加(4.61%),成为主导脱氮菌群,将反应器内 NO₃⁻-N 还原为气态氮,导致反应器运行后期,对 TN 的去除效率一直保持较高的水平(去除率基本在 60%)。

Kumar 等^[34]研究发现,芽孢杆菌属(*Bacillus*)适应性较强,在各种条件下均有较好的反硝化效率。同时,研究也发现部分半硝化 AGS-SBR 反应器内有厌氧氨氧化菌 *Candidatus* 的存在。因此本研究发现部分半硝化工艺启动成功时反应器中存在自养反硝化、短程脱氮、厌氧氨氧化等多种脱氮途径是一个复杂的混合系统,使本研究中部分半硝 AGS-SBR 工艺的 TN 去除率达到了 62.04%,缓解了后续工艺上的脱氮压力。综上,高氨氮浓度对部分半硝化工艺的启动运行起至关重要的作用,随着氨氮浓度的提高,系统内菌群结构发生了较大的变化,微观上体现了部分半硝化工艺的启动过程以及成功实现。

3 结论

(1) 在序批式污泥反应器(SBR)中,接种好氧颗粒污泥,处理低 COD/N 废水,在 pH 7.5~8.5,温度为 30℃,DO 约为 0.8 mg·L⁻¹的条件下,通过逐步提高进水氨氮浓度策略,60 d 后部分半硝化工艺初步启动成功。反应器成功运行期间,氨氮、TN 平均去除率分别为 72.34% 和 60%,氨氮平均出水浓度为 63.40 mg·L⁻¹, NO₂⁻-N 平均出水浓度为 68.97 mg·L⁻¹, NO₂⁻-N 平均积累率为 81.22%, NO₂⁻-N/ NH₄⁺-N 比为 1.1 左右。

(2) 高通量测序结果表明,和接种污泥相比,部分半硝化 AGS-SBR 工艺系统内微生物菌群结构发生了明显变化。部分半硝化工艺反应器中主要优势菌群(门水平)有: Candidate-division-TM7、变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、厚壁

菌门(Firmicutes)、绿弯菌门(Chloroflexi)、绿菌门(Chlorobi);(属水平)主要有:*Candidate-division-TM7-norank*、*Saprospiraceae-uncultured*、*Thauera*、*Denitratisoma*、*Anaerolineaceae-uncultured* 和 *Anaerovorax*。

(3) 部分半硝化 AGS-SBR 系统中,与脱氮功能相关的菌群为:*Nitrosomonas*、*Denitratisoma*、*Thauera* 和 *Bacillus* 等。

参考文献:

- [1] 余波, 江传春, 陈婷婷, 等. 新型一体式生物流化床——生物滤池处理低 C/N 废水研究[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(4): 171-174.
Yu B, Jiang C C, Chen T T, *et al.* Study on a novel integrated biological fluidized-bed-biofilter for treatment of wastewater of low C/N[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **37**(4): 171-174.
- [2] Moy B Y, Tay J H, Toh S K, *et al.* High organic loading influences the physical characteristics of aerobic sludge granules[J]. Letters in Applied Microbiology, 2002, **34**(6): 407-412.
- [3] 郑冰玉, 张树军, 张亮, 等. 一体化厌氧氨氧化工艺处理垃圾渗滤液的性能研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(7): 1728-1733.
Zheng S B, Zhang S J, Zhang L, *et al.* Study on the performance of integrated anammox process treating landfill leachate[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(7): 1728-1733.
- [4] 周呈, 黄勇, 李祥. 部分亚硝化——厌氧氨氧化联合工艺处理高氨氮废水研究进展[J]. 水处理技术, 2014, **40**(4): 11-15.
Zhou C, Huang Y, Li X. Research progress in high ammonia-nitrogen wastewater treatment by combined technology of partial nitrification-anaerobic ammonium oxidation[J]. Technology of Water Treatment, 2014, **40**(4): 11-15.
- [5] Li X R, Du B, Fu H X, *et al.* The bacterial diversity in an anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) reactor community[J]. Systematic and Applied Microbiology, 2009, **32**(4): 278-289.
- [6] Qiao S, Yamamoto T, Misaka M, *et al.* High-rate nitrogen removal from livestock manure digester liquor by combined partial nitrification-anammox process[J]. Biodegradation, 2010, **21**(1): 11-20.
- [7] Fux C, Bohler M, Huber P, *et al.* Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant[J]. Journal of Biotechnology, 2002, **99**(3): 295-306.
- [8] Van Dongen U, Jetten M S, Van Loosdrecht M C. The SHARON-Anammox process for treatment of ammonium rich wastewater[J]. Water Science and Technology, 2011, **44**(1): 153-160.
- [9] Okabe S, Oshiki M, Takahashi Y, *et al.* Development of long-term stable partial nitrification and subsequent anammox process[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(13): 6801-6807.
- [10] Li H S, Zhou S Q, Huang G T, *et al.* Achieving stable partial nitrification using endpoint pH control in an SBR treating landfill leachate[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2014, **92**(3): 199-205.
- [11] Lee P H, Cotter S F, Prieri S C R, *et al.* pH-gradient real-time aeration control for nitrification community selection in a non-porous hollow fiber membrane biofilm reactor (MBFR) with dilute wastewater[J]. Chemosphere, 2013, **90**(8): 2320-2325.
- [12] Cho S, Fujii N, Lee T, *et al.* Development of a simultaneous partial nitrification and anaerobic ammonia oxidation process in a single reactor[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(2): 652-659.
- [13] 李长波, 赵国峥, 邱峰. 干法腈纶废水在限氧 SBR 反应器中的部分亚硝化[J]. 中国给水排水, 2014, **30**(9): 125-129.
Li C B, Zhao G Z, Qiu F. Partial nitrification of dry-spun acrylic fiber wastewater in SBR under limited oxygen condition[J]. China Water & Wastewater, 2014, **30**(9): 125-129.
- [14] Guo X, Kim J H, Behera S K, *et al.* Influence of dissolved oxygen concentration and aeration time on nitrite accumulation in partial nitrification process[J]. International Journal of Environmental Science & Technology, 2008, **5**(4): 527-534.
- [15] 李祥, 陈宗炬, 黄勇, 等. 控制 ORP 实现连续流反应器部分亚硝化稳定运行[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(12): 3086-3092.
Li X, Chen Z Y, Huang Y, *et al.* Stable operation of partial nitrification by controlling ORP in continuous flow reactor[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(12): 3086-3092.
- [16] Tokutomi T, Yamauchi H, Nishimura S, *et al.* Application of the nitrification and anammox process into inorganic nitrogenous wastewater from semiconductor factory[J]. Journal of Environmental Engineering, 2011, **137**(2): 146-154.
- [17] 刘文如, 丁玲玲, 王建芳, 等. 低 C/N 比条件下亚硝化颗粒污泥的培养及成因分析[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(8): 2226-2233.
Liu W R, Ding L L, Wang J F, *et al.* Granulation of granular nitrification sludge at low C/N ratio[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(8): 2226-2233.
- [18] Di Bella G, Torregrossa M. Simultaneous nitrogen and organic carbon removal in aerobic granular sludge reactors operated with high dissolved oxygen concentration[J]. Bioresource Technology, 2013, **142**: 706-713.
- [19] 姚力, 信欣, 鲁航, 等. 连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2627-2632.
Yao L, Xin X, Lu H, *et al.* Cultivation of aerobic granular sludge with real low concentration domestic wastewater and its denitrification performances under the continuous flow[J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2627-2632.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 258-280.
- [21] Guo F, Zhang T. Biases during DNA extraction of activated sludge samples revealed by high throughput sequencing[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, **97**(10): 4607-4616.
- [22] 张楠, 初里冰, 丁鹏元, 等. A/O 生物膜法强化处理石化废水及生物膜种群结构研究[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(1): 80-86.
Zhang N, Chu L B, Ding P Y, *et al.* Enhanced treatment of petrochemical wastewater by using A/O biofilm reactor and analysis of biofilm community[J]. China Environmental Science,

- 2015, **35**(1): 80-86.
- [23] 陈益明. SBR 反应器实现半亚硝化的启动策略[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2013, **52**(2): 233-236.
- Chen Y M. Research of the start-up strategy on half-nitrosation in SBR[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2013, **52**(2): 233-236.
- [24] 李东, 陶晓晓, 李占, 等. SBR 亚硝化快速启动过程中影响因素研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(8): 2317-2322.
- Li D, Tao X X, Li Z, *et al.* Factors of the rapid startup for nitrosation in sequencing batch reactor [J]. Environmental Science, 2011, **32**(8): 2317-2322.
- [25] 张子健, 王舜和, 王健龙, 等. 利用碱度控制 SBR 中短程硝化反应的进程[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, **48**(9): 1475-1478.
- Zhang Z J, Wang S H, Wang J L, *et al.* Effect of alkalinity on the $[\text{NH}_4^+ - \text{N}]$ ratio during partial nitrification in a sequencing batch reactor[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008, **48**(9): 1475-1478.
- [26] 陈建伟, 郑平, 陈小光, 等. 短程硝化过程碱度变化规律与控制对策研究[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(21): 105-108.
- Chen J W, Zheng P, Chen X G, *et al.* Study on change and control of alkalinity in SHARON process[J]. China Water & Wastewater, 2011, **27**(21): 105-108.
- [27] 李祥, 黄勇, 朱莉, 等. 厌氧氨氧化前置亚硝化反应器启动及稳定研究[J]. 水处理技术, 2013, **39**(7): 96-99.
- Li X, Huang Y, Zhu L, *et al.* Study on start-up and stability of pre-nitrification reactor for anammox [J]. Technology of Water Treatment, 2013, **39**(7): 96-99.
- [28] 陈亚坤, 陈繁荣, 李翔宇. 部分硝化——厌氧氨氧化反应器处理养猪场废水的模拟试验研究[J]. 水处理技术, 2013, **39**(9): 104-108.
- Chen Y K, Chen F R, Li X Y. The research on the simulator of the partial nitrification-anammox reactor for treatment of piggery wastewater[J]. Technology of Water Treatment, 2013, **39**(9): 104-108.
- [29] 张昭, 李冬, 曾辉平, 等. 常温下部分亚硝化的启动中试研究[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(17): 21-25.
- Zhang Z, Li D, Zeng H P, *et al.* Start-up of pilot-scale partial nitrification reactor under room temperature and reduced DO conditions[J]. China Water & Wastewater, 2012, **28**(17): 21-25.
- [30] 王惠, 易鹏, 张树军, 等. 短程硝化-ANAMMOX 反应器处理城市污水过程中脱氮微生物的群落解析[J]. 中国科学院研究生院学报, 2012, **29**(1): 38-46.
- Wang H, Yi P, Zhang S J, *et al.* Functional microbial community composition analysis in the laboratory-scale stable partial nitrifying-ANAMMOX municipal wastewater reactor[J]. Journal of the Graduate school of the Chinese Academy of Sciences, 2012, **29**(1): 38-46.
- [31] Amann R I, Ludwig W, Schleifer K H. Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation[J]. Microbiological Reviews, 1995, **59**(1): 143-169.
- [32] Calvó L, Vila X, Abella C A, *et al.* Use of the ammonia-oxidizing bacterial-specific phylogenetic probe Nso1225 as a primer for fingerprint analysis of ammonia-oxidizer communities [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2004, **63**(6): 715-721.
- [33] Mao Y P, Xia Y, Zhang T. Characterization of *Thauera*-dominated hydrogen-oxidizing autotrophic denitrifying microbial communities by using high-throughput sequencing [J]. Bioresource Technology, 2013, **128**: 703-710.
- [34] Kumar M, Yan L O, Lin G J. Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio[J]. Waste Management, 2010, **30**(4): 602-609.

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring	 YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
¹³ C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO ₂ During Youth Olympic Games, Nanjing	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions	 LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs	 HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons	 WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization	 ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example	LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO ₂ Using QCM-D and AFM	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N ₂ H ₄ Addition	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits	 WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA)	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO ₂ Emission from Soils of Summer-maize Field	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City	 CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin	 LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvio-aquic Soil of Hebei Plain	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration	 CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSWI Fly Ash with Various Particle Sizes	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行